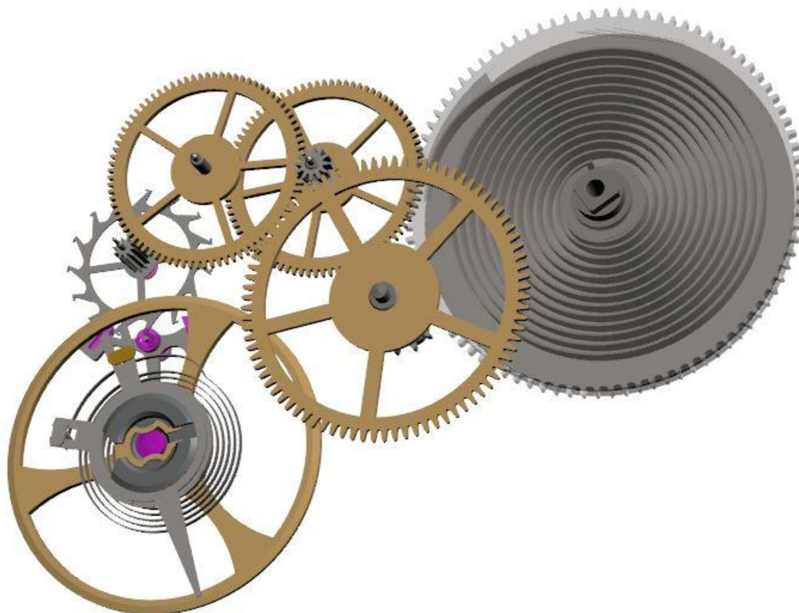
The Janus Huibregt collection, Delft

Mechanische uurwerken

Nationale wiskunde dagen, Noordwijkerhout 3 en 4 februari 2017



Door Gertjan Westerbeke

Mechanische uurwerken

Technologie is constant in ontwikkeling maar in de klassieke mechanica is weinig veranderd.
Een mechanisch uurwerk heeft interessante techniek waarvan de oorsprong vaak in een ver verleden ligt. In hedendaagse horloges word volop gebruikt gemaakt van onder andere toepassingen zoals de Archimedes spiraal en cycloïden.
In deze lezing komt U meer te weten over de werking van een uurwerk en de herkomst van moderne uurwerktechniek.
Het startpunt ligt bij de meetinstrumenten van Prof. Vening Meinesz, die hij gebruikte voor zijn beroemde "Gravity expeditions at sea" in samenwerking met de Koninklijke Marine.

Naast deze lezing wordt gebruik gemaakt van een multimedia presentatie.

Aansluitende workshop
Onder begeleiding van een proffesioneel horlogemaker werkt u aan een Zwitsers mechanisch uurwerk.
Met behulp van diverse gereedschappen demonteert u zelf een gedeelte van het uurwerk en krijgt u inzicht in de toegepaste techniek.

Inhoudsopgave

1 Vening Meinesz expeditie

1.1 De expeditie

Begin 1900 was het zwaartekrachtsveld van de aarde uitsluitend gemeten vanaf het land.
Het klassieke enkel-slingerinstrument had namelijk een stabiele ondergrond nodig: onhaalbaar op schepen. Maar liefst 73 procent van het zwaartekrachtsveld op aarde was daarmee nog onbekend voor de geodetische gemeenschap. Een jonge civiele ingenieur bracht daar verandering in: in 1915 kreeg de jonge doctor Felix Andries Vening Meinesz van de Rijkscommissie voor Graadmeting de taak om het eerste Nederlandse zwaartekracht-referentienetwerk op te zetten. Hij ontwierp speciaal hiervoor een slingerapparaat, ook wel ‘Het Gouden Kalf’ genoemd, dat het zwaartekrachtsveld met de hoogste nauwkeurigheid kon bepalen. Dit apparaat bleek zo effectief te zijn in het verwijderen van externe beweging, dat Vening Meinesz besloot het in onderzeeboten te gebruiken. Uiteindelijk opende dit de mogelijkheid voor oceanografisch zwaartekrachtonderzoek, wat leidde tot vele ontdekkingen die de theorie van plaattektoniek tot stand brachten.

Uit de sessie van Bart Root, blok 4

1.2 De instrumenten van Vening Meinesz

Observatorium klok Strasser en Rohde no. 233

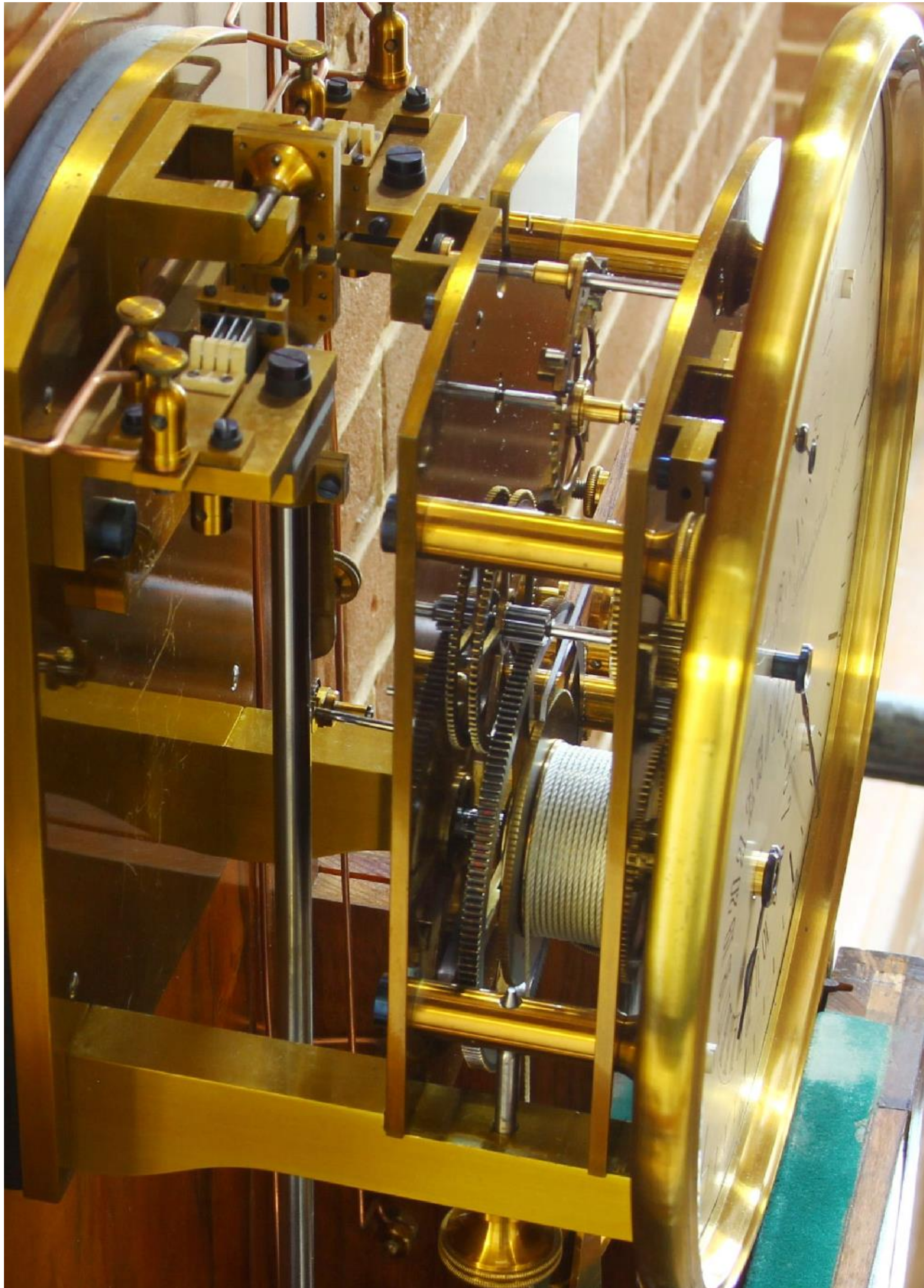
Door de Leidse sterrenwacht werd in 1897 de Strasser & Rohde no. 178 en later in 1901 de Strasser & Rohde no. 233 aangeschaft.
De S&R 233 is in 1904 overgeplaatst naar het gebouw voor Geodesie aan de kanaalweg 4 te Delft. Er was een telefoonlijn tussen de sterrenwacht in Leiden en het Geodesie gebouw in Delft, want naast de geografische lengte tussen beide observatoriums moest ook de Nederlandse tijd bepaald en doorlopend gecontroleerd worden.
De Nederlandse tijd gold van 1909 tot 1940. De Nederlandse tijd was 19 minunten en 32.13 seconden voor op de tijd van Greenwich.
Regelmatig, één maal per week, werd er zowel in Leiden als in Delft een controle meting uitgevoerd aan de hand van de doorgang van de zon door de meridiaan ter plaatse, of met behulp van enkele sterren.
Na 1930 waren er andere uurwerken (kwarts) en radiotijdsignalen, de controlemetingen met behulp van een doorgangsinstrument (theodoliet) was niet meer nodig.

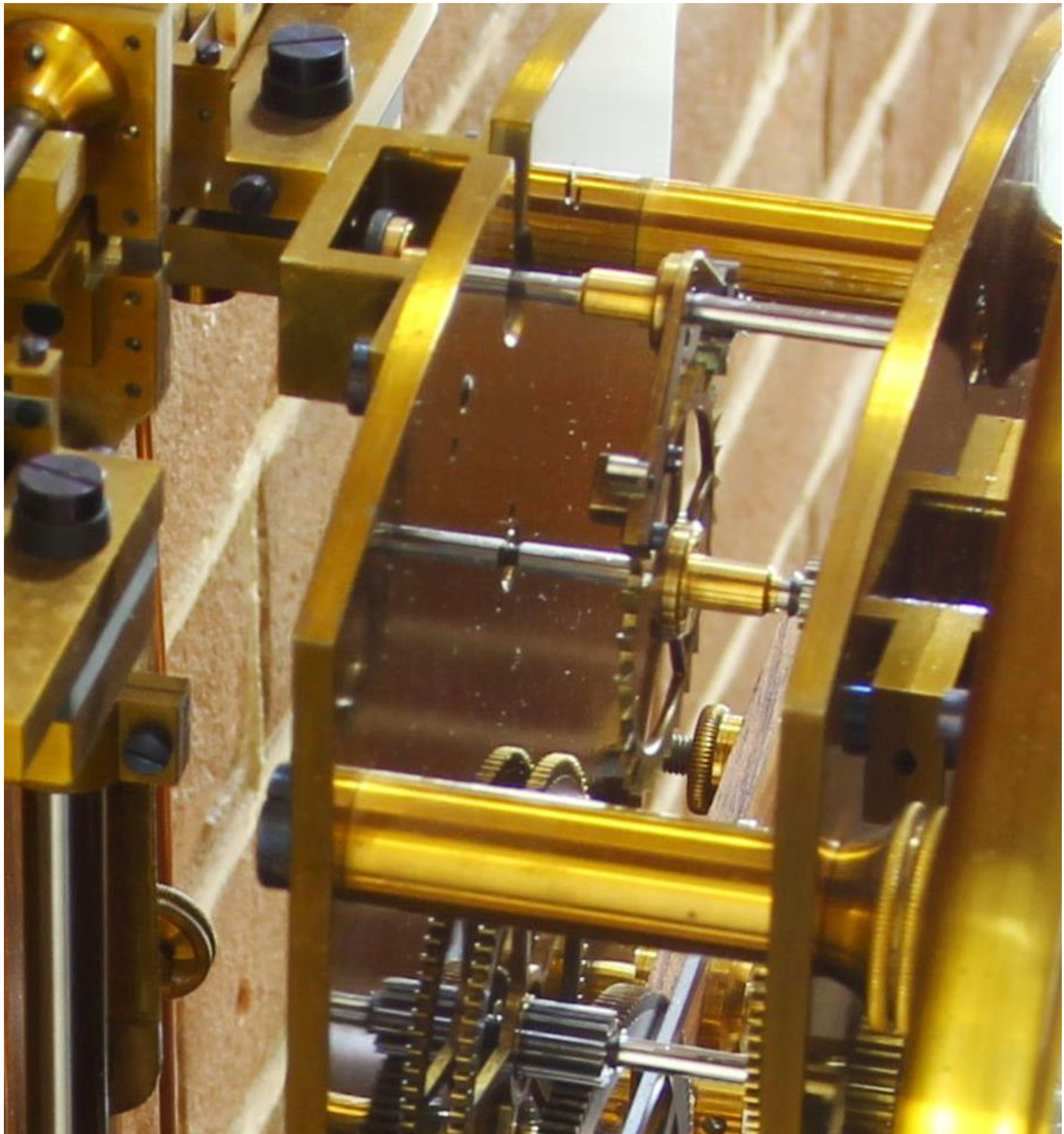
De Strasser & Rohde no. 233 is een precisie slingeruurwerk van de 1e kwaliteit.
Het uurwerk is uitgevoerd met een Graham echappement met saffieren paletten en het raderwerk gedeeltelijk met saffieren lagerstenen. De slinger is een temperatuur compensatie slinger naar ontwerp van Moritz Grossmann. De cilindrische slingermassa is met kwik gevuld en reageert op temperatuurschommelingen. In de 2014 heeft KLOKby uit Delft het uurwerk afgeregeld en een aantal metingen gedaan om de nauwkeurigheid vast te stellen.



Observatoriumklok Strasser & Rohde no.233 foto Sander van Dam

Specificaties:
-Uurwerk met secondeslinger en elektrische schakeling voor een secondesignaal.
-Kwikcompensatie slinger.
-Uurwerk met Grahamgang, saffieren palletten.
-Raderwerk klasse 1, geschroefde chatons met saffier messing lagers.
-Gewichtaandrijving met stuitmechanisme





Het echappement: Grahamgang met saffierpalletten.



Het regelorgaan: Stalen kwikcompensatie-slinger (Grossmann) met fijnafregeling en microafregeling.



Microregeling; +/-100 Mg toevoegen geeft ongeveer 0.1 sec. versnelling per 24 uur.

Deze afregelmethode op de slinger is een variant op de Huygensloper, een toepassing beschreven door Christiaan Huygens in zijn Horologium Oscillatorium.

Huygens was in staat om de slinger met behulp van een verschuifbaar gewichtje een versnelling te geven van 15 seconden per 24 uur. Dit gewichtje moet op een berekende positie op de slingerstaaf geplaatst worden en daarna per schaalverdeling omhoog of omlaag geschoven worden.

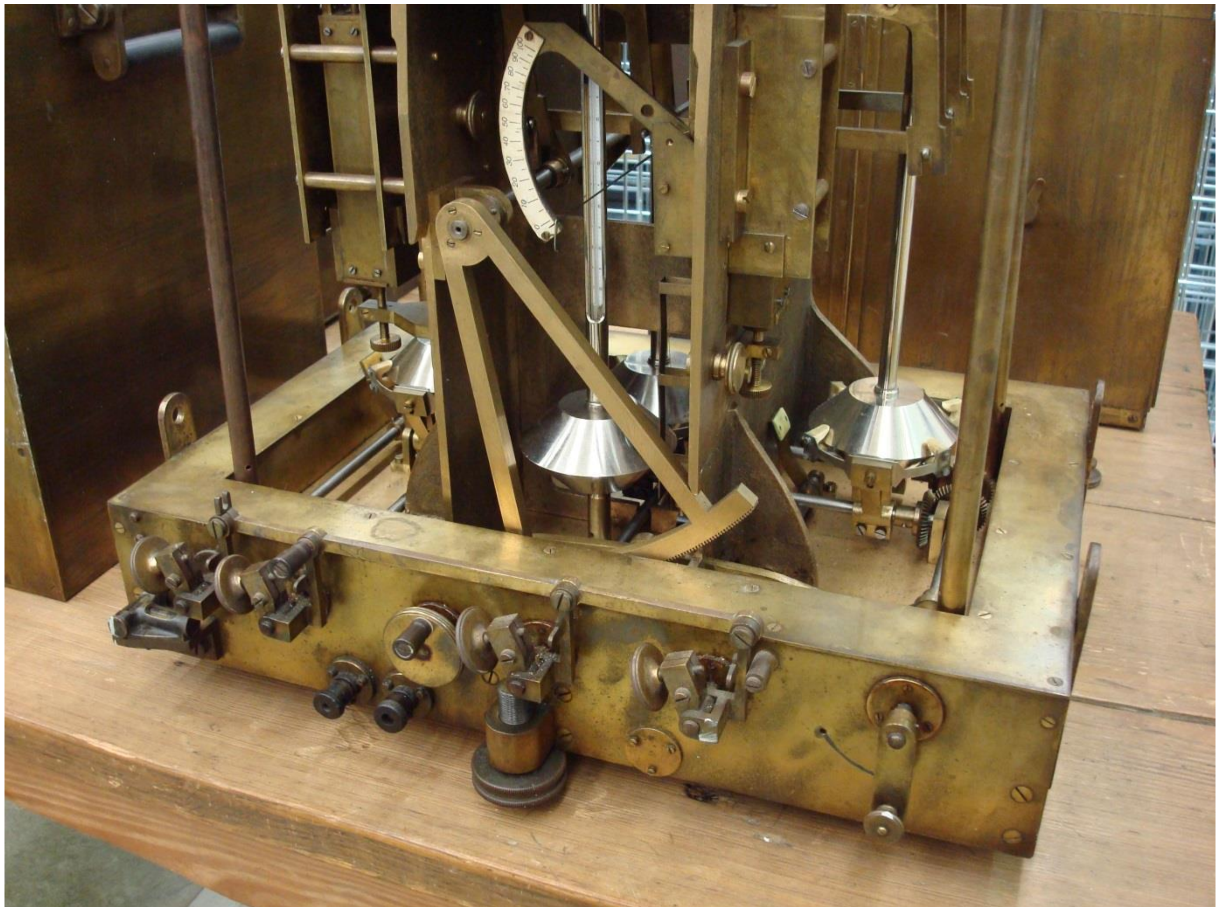
De uitvoering hierboven is een vaste tafel waar een minimale massa aan toegevoegd kan worden om zo een versnelling te krijgen. Het voordeel hiervan is dat het regelorgaan vrij kan blijven oscilleren tijdens het afregelen.



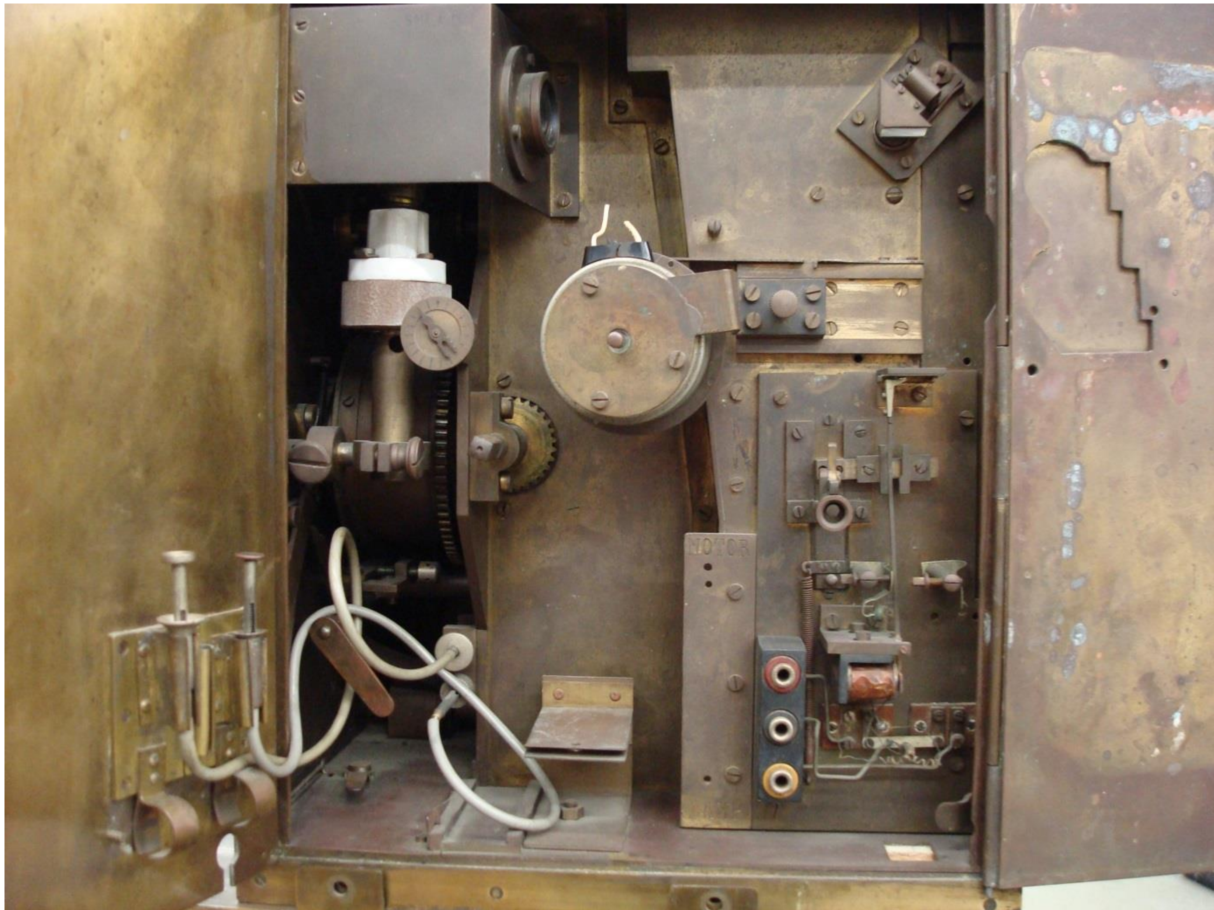
Fijnregeling onderaan de slingermassa.
Hiermee kan het slingerzwaartepunt verplaatst worden, één omwenteling is verdeeld in 50 delen, 1 deel = +- 1 sec./24 uur versnellen of vertragen.

Zwaartekracht meetinstrument “Het Gouden Kalf”

Dit zwaartekracht meetinstrument ofwel gravimeter is ontwikkeld door Vening Meinesz om aan boord van een schip metingen te kunnen verrichten.
Drie identieke precisie slingers zijn vrij opgehangen in het instrument. Een optische waarneming van de slingerbeweging zorgt er voor dat er uiterst nauwkeurig een periode van deze slingerbeweging vastgesteld kan worden.
Bij een slinger is de tijdsduur van een periode afhankelijk van de zwaartekracht op dat moment.



De 4^{e} slinger aan de voorzijde (bovenstaande afbeelding) is een statische slinger. In deze slinger zit een thermometer gemonteerd in de slingerstaaf. Hierdoor is de temperatuur van de slingers ten allen tijde vast te stellen.



Aan het paneel linksonder zit een scheepschronometer verbonden.
Een scheepschronometer was op dat moment de meest nauwkeurige tijdmeter welke werkt onafhankelijk van de zwaartekracht.
Via deze scheepschronometer ontving de optische sensor van de gravimeter een exact tijdsignaal wat een vergelijking opleverde met de slingerperiode van de slingers.



Een afbeelding van Vening Meinesz tijdens een meting met zijn gravimeter.

Scheepschronometer Ulysse Nardin no. 212

De scheepschronometer UN 212 is gebruikt door Vening Meinesz tijdens zijn expedities per onderzeeboot. De scheepschronometer was verbonden met het zwaartekracht meetinstrument “het gouden kalf” en zorgde voor een zeer nauwkeurige tijdmeting.
De scheepschronometer is cardanische opgehangen in houten kist en is gemaakt door de firma Ulysse Nardin uit Le Locle, Zwitserland.



Uit het begeleidende chronometercertificaat van het observatorium te Neuchatel blijkt dat de klok loopt met een gemiddelde afwijking van +-0,04 sec. per 24 uur.

Le soussigné certifie que le CHRONOMÈTRE DE MARINE

N.° Deux cent douze (212)

échappement à ressort spiral acier, cylindrique

balancier Guillaume, enregistrement électrique; réglé au temps sidéral

de Monsieur Paul D. Nardin au Locle.

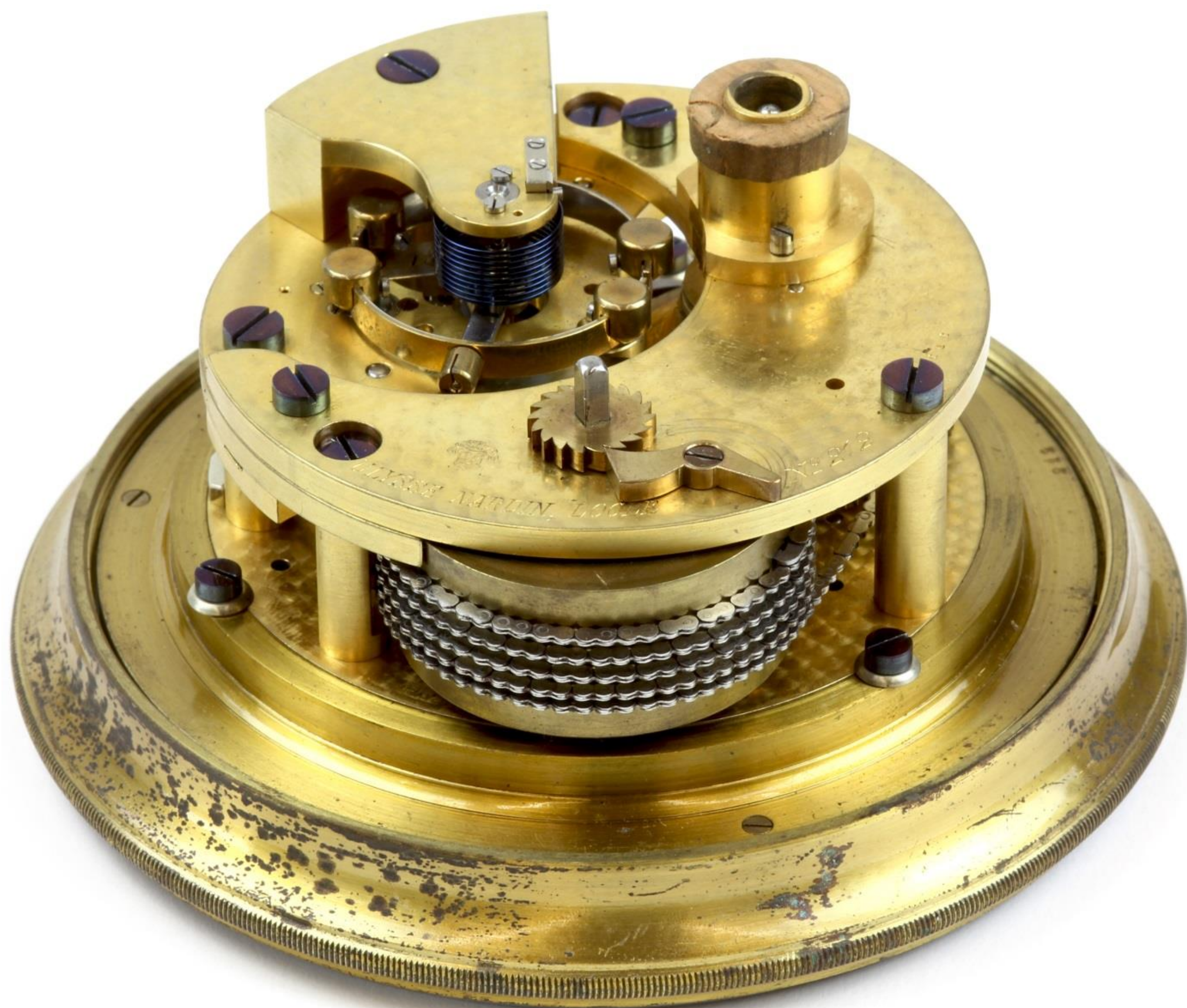
a subi les épreuves conformément au règlement (voir au verso) et a donné les résultats suivants:

Marche à la température 17°9	−0,82
Ecart moyen de la marche diurne	± 0,04
Coefficient thermique	+ 0,017
Erreur moyenne de la compensation	± 0,18
Reprise de marche	− 0,19

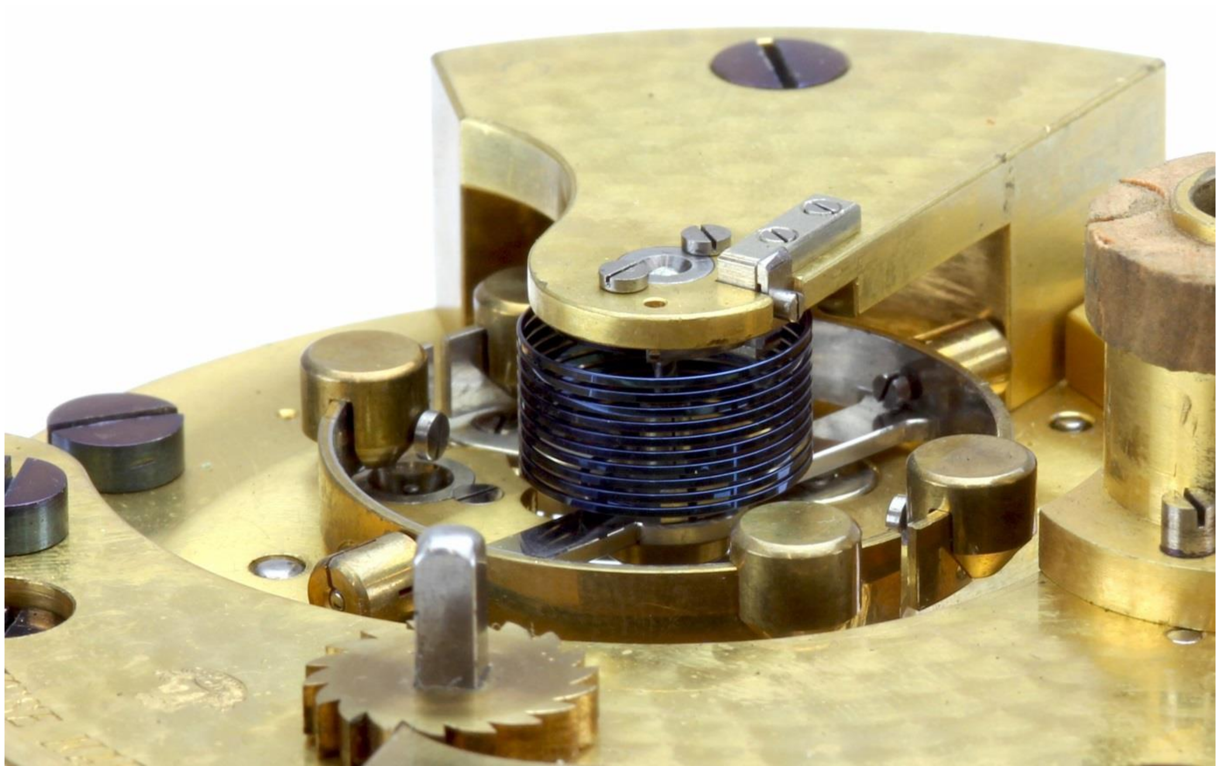
République et Canton de Neuchâtel
Observatoire Cantonal

Le Directeur de l'Observatoire,

Dr L. Arndt.



Specificaties
Geproduceerd: circa 1903-1904
Aandrijving: veeropwinding
Gangreserve: 56 uur
Echappement: chronometergang met veer
Regelorgaan: Guillaume compensatiebalans, cilindrische stalen spiraalveer
Frequentie: 2,0 Hz
Aflezing: Uren, minuten, (½) seconden, gangreserve indicatie
Lageringen: Gangrad met robijnen deksteen, balanskloof met diamanten deksteen.
Bijzonderheden: Elektrische schakelinrichting op het secondenrad.



Het regelorgaan met een Guillaume (Charles Edouard Guillaume) compensatiebalans en stalen cilindrische spiraalveer.

De balans oscilleert met 2 perioden per seconde.
Dit geeft in een chronometergang 7200 tikken per uur doordat het regelorgaan 1 x per periode een impuls krijgt en een tand laat ontsnappen.

Werking van de compensatiebalans
De balans heeft een bimetalen balansband van nikkelstaal (invar) en messing.
De balansband is voorzien van 2 inertie schroeven voor de fijnafregeling van de balansfrequentie en 4 verschuifbare gewichten voor het afstellen van de compensatie.
De spiraal is van gehard en getemperd staal en cilindrisch van vorm.
Bij een stijgende temperatuur zal de stalen spiraal uitzetten met als gevolg; het regelorgaan vertraagd in zijn frequentie.
Tegelijkertijd zal de bimetalen balansband ook uitzetten, voornamelijk het messing, waardoor de gewichten naar binnen verplaatst worden, gevolg; het regelorgaan versneld.

Chronometer rattrapante Ulysse Nardin no. 17984 en de Holweck-Lejay



Foto Sander van Dam

In de bovenstaande afbeelding zien we een Holweck-Lejay gravimeter en een chronometer.
Dit instrument werd door Vening Meinesz aan land gebruikt voor zwaartekracht metingen.
Het draagbare chronometer is nodig om over een exact tijdsbestek een meting uit te voeren met deze Holweck-Lejay.

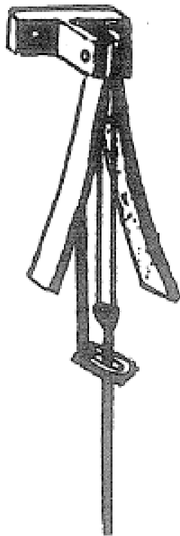
2 Cycloïden in een uurwerk

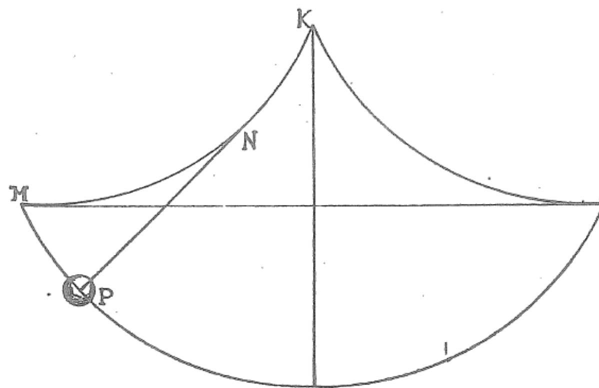
2.1 Christiaan Huygens

Vanaf het moment dat Huygens zijn horologium oscillatorium schreef worden er cycloïden toepast in de uurwerktechniek.

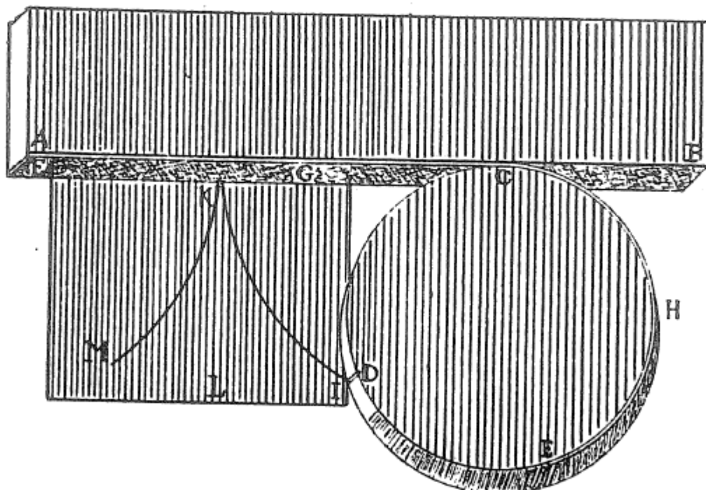
De slinger

De meest bekende toepassing van Huygens zijn de cycloïdale boogjes in de slingerophanging welke de slingerbeweging afbuigen. Bij een grotere amplitude wordt de slingerbaan sterker afgebogen.



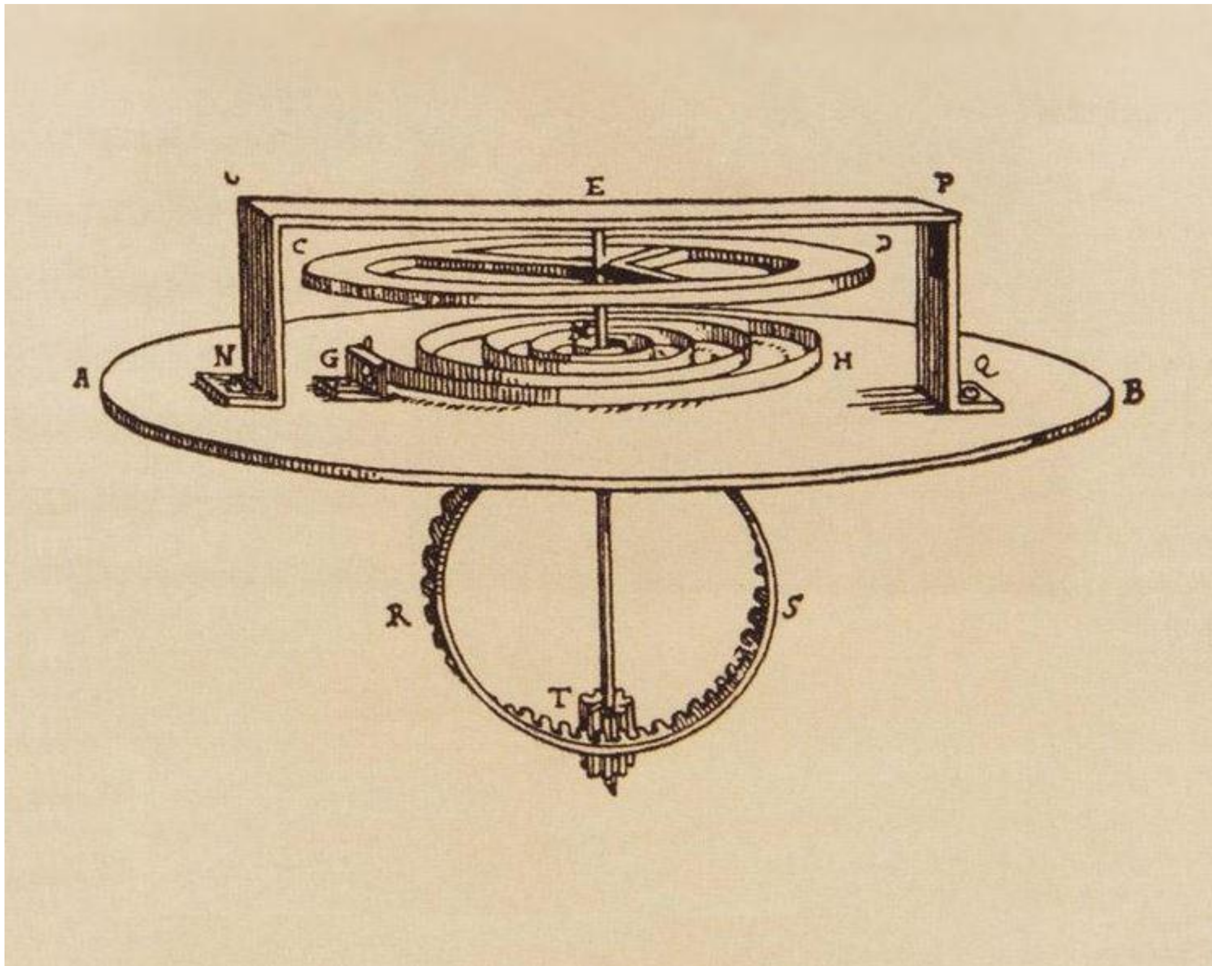


De constructie van de cycloïde is ook door Huygens beschreven en volgt uit het afrollen van een cirkel met een diameter gelijk aan de halve slingerlengte.



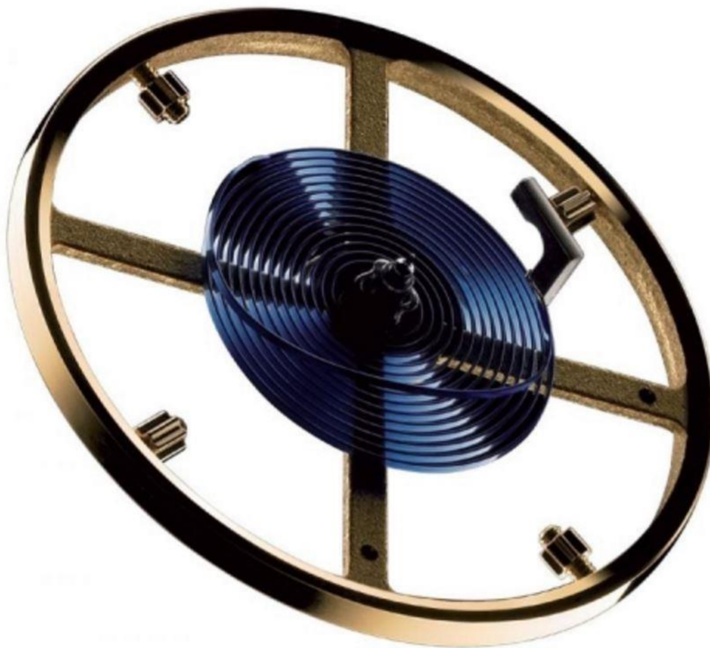
De balans en spiraal

Een tweede maar minder bekende vinding van Huygens is de balans met spriraal als regelorgaan. Huygens combineerde een balans met een stalen spiraalveer om op deze manier een regelorgaan te maken van onafhankelijk van de zwaartekracht kan funtioneren.
Een toepassing waar in de miljardenmarkt van de mechanische horlogerie nog dankbaar gebruikt van wordt gemaakt.



Schetsontwerp balans met spiraal, 1675.

Hedendaagse uitvoeringen van een regelorgaan.



Bovenstaande afbeelding van een Rolex balans met (vrije) Archimedes spiraal en overliggende eindbocht, zgn. Breguetspiraal of Phillips curve. Deze eindcurve geeft een beter isochronisme.

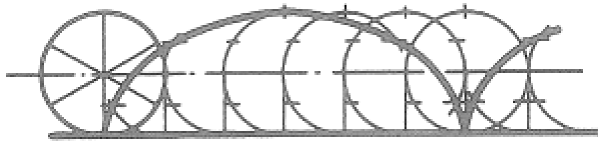


Soortgelijke balans van Omega met vlakke Archimedes spiraal in silicium.

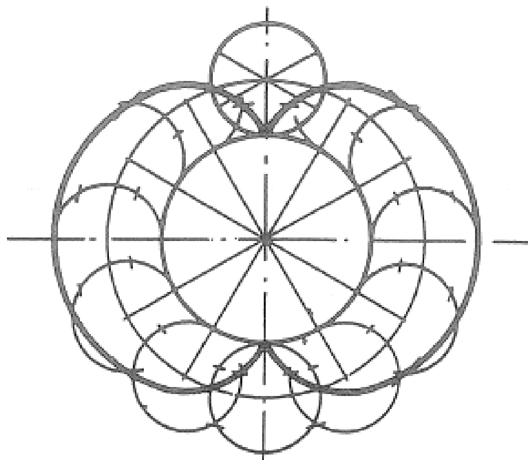
2.2 Tandwielen

Bij tandwielen in raderwerken is er volop gebruik gemaakt van cycloïden.
Hieronder een overzicht van gebruikte cycloïden en hun toepassing bij zogenaamde cycloïdale vertandingen.

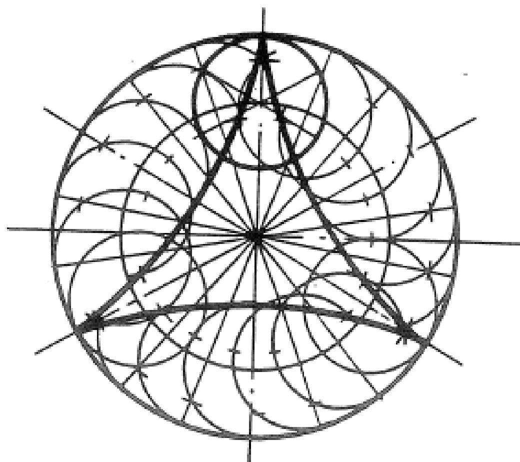
De cycloïde, gebruikt voor tandspitscontructies



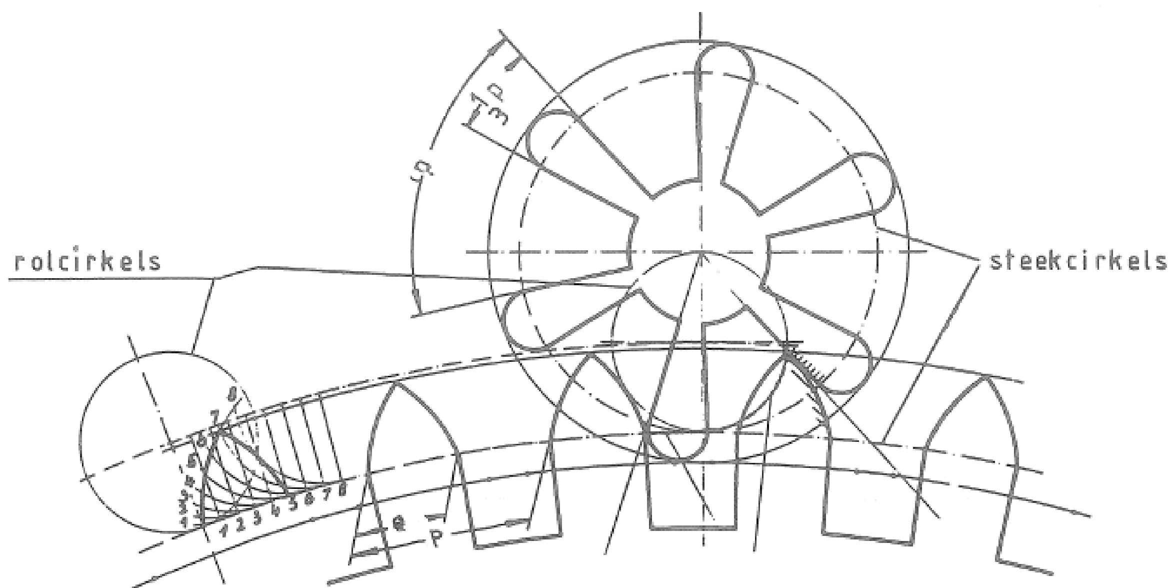
De epicycolïde, gebruikt voor tandspitscontructies



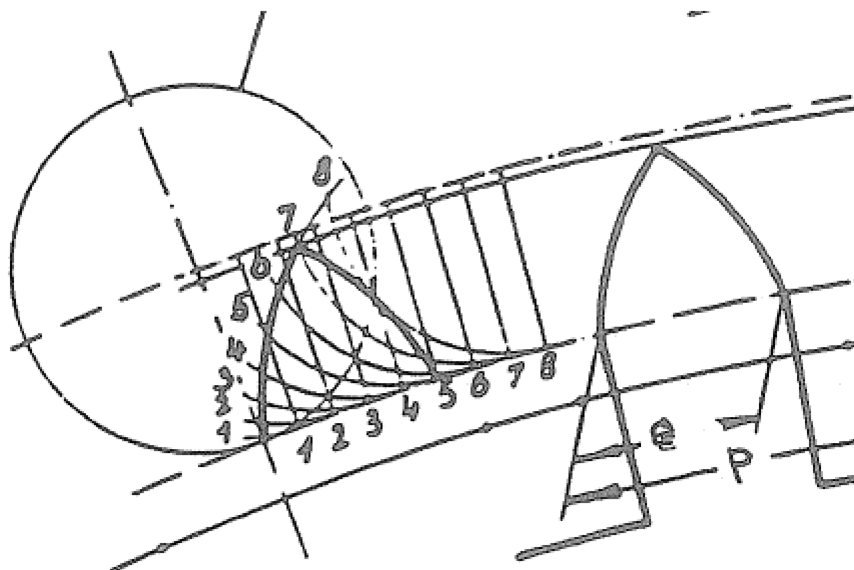
De hypocycloïde, toegepast bij de tandflanken



Een voorbeeld van een cycloïdale vertanding.

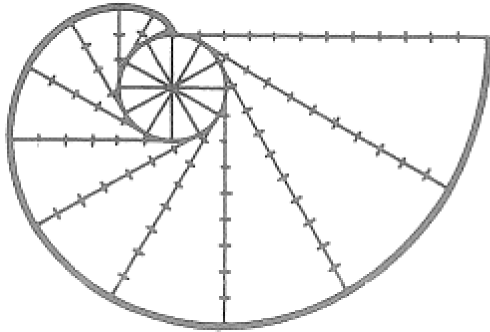


De bovenstaande tandspitsen van het rad ontstaan uit de epicycloïde beschreven door de rolcirkel van het rondsel.

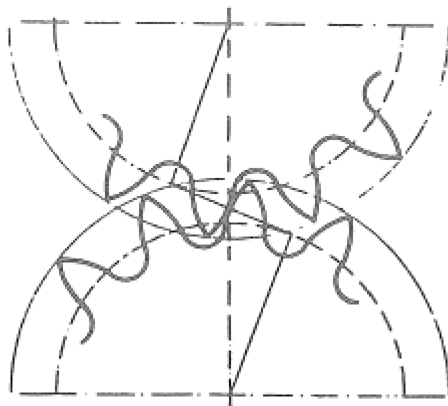


De evolvente

De zogenaamde evolvente vertandingen hebben voor de tandspits en tandvoet een constructie welke onstaat uit een evolvente.



Voorbeeld van een evolvente vertanding, door een constante drukhoek van 20 graden wezenlijk anders qua contructie dan een cycloïdale vertanding.



In de Zwitserse uurwerktechniek zijn de huidige toegepaste tandprofielen gestandariseerd in de NIHS norm, Norm International Horlogerie Suisse.

Als we die norm bestuderen zal blijken dat de cycloiden vervangen zijn door krommen ontstaan uit een radius.
In de praktijk is gebleken dat bij het vervaardigen van een tandwiel de technologie het niet toelaat een cycloide met microscopische afmetingen over te nemen in messing of staal.

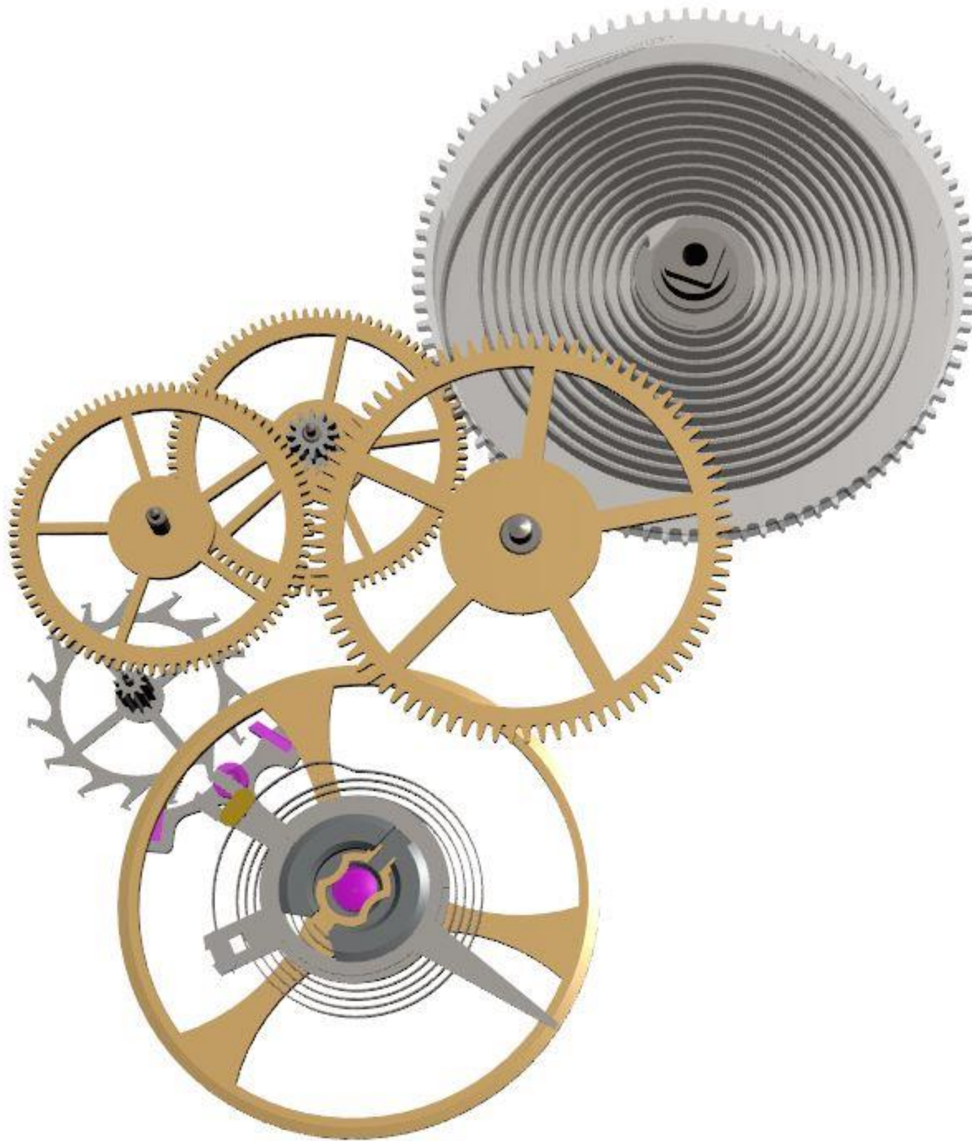
3 Workshop mechanisch uurwerk

3.1 De opbouw van een uurwerk

Om inzicht te krijgen in de werking van een eenvoudig mechanisch uurwerk kunnen we de functies opdelen in een aantal basiselementen.

ENERGIEBRON	Bij handopwinding of kinetische energie is deze bewegingsenergie opgewekt door de mens, de drager zelf. De bewegingsenergie word opgeslagen in een veertrommel met opwindveer.
ENERGIEOPSLAG	Bij elektrische uurwerken kan de energie uit zonlicht komen d.m.v. zonnecellen en opslag in een accu.
OVERBRENGING	De overbrenging ofwel transmissie van de energie gaat met behulp van getande wielen.
DISTRIBUTIE	Een echappement zorgt voor de verdeling van de energie. Bij een kwartsuurwerk is dit de stappenmotor.
REGULATIE	Het regelorgaan is een onderdeel wat de frequentie van de beweging bepaald, zoals een balans en spiraalveer of een slinger of kwartskristal
WEERGAVE	Een wijzerplaat en wijzers geven de weergave van tijd. De wijzers maken de positie van de transmissie zichtbaar.

3.2 Raderwerk



Afbeelding 7 krachtbron en overbrenging

Bovenin de afbeelding kijken we in een transparante veertrommel waarin de opwindveer te zien is. Deze opwindveer vormt de krachtbron van het uurwerk. Het binnenste gedeelte van de veertrommel is de tonas. Het ene uiteinde van de opwindveer zit gekoppeld met de tonas en het andere uiteinde met de veertrommel. De veertommel heeft een vertanding welke ingrijpt met het centrumrad. Het derderad grijpt in het seconderad. Het seconderad brengt de kracht over naar het ankerradrondsel, het laatste rad in de radertrein.

3.3 Echappement

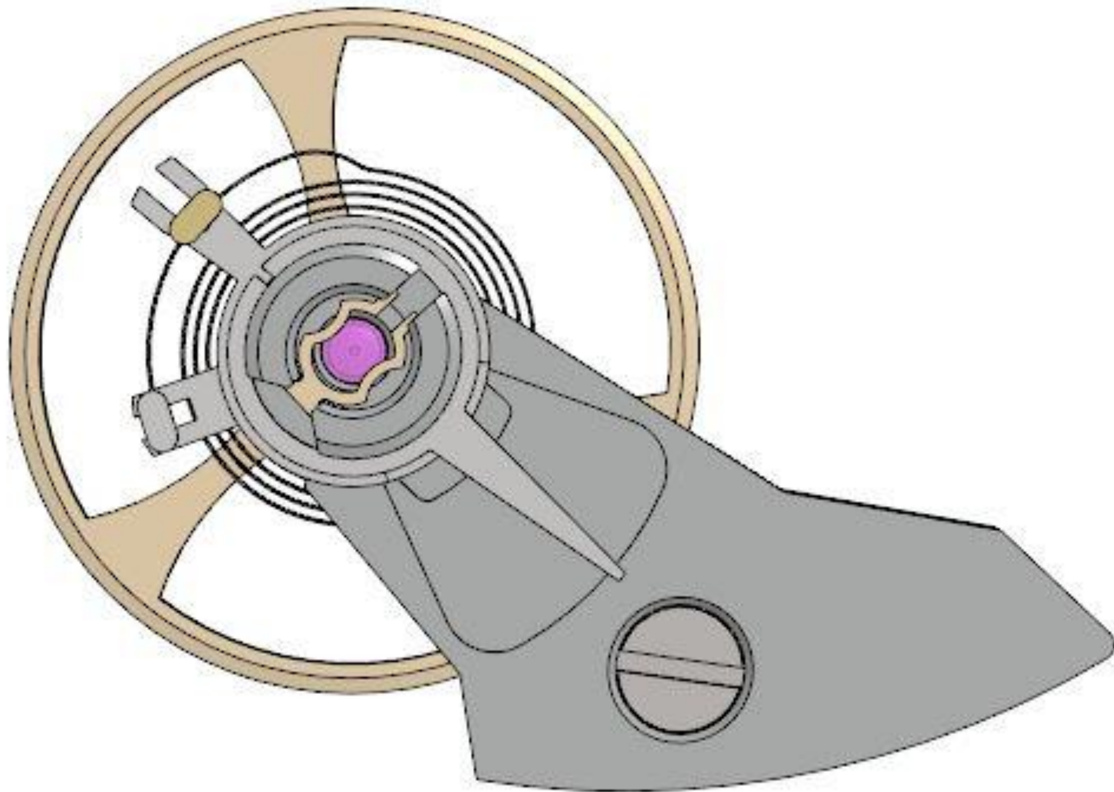


De energie van de krachtbron komt via de radertrein bij het echappement.
Het ankerrad is het laatste rad in de radertrein en is een onderdeel van het echappement.

Het echappement zet de ronddraaiende om in een heen en weer gaande beweging. Tijdens deze heen-en weer gaande beweging ontsnapt er een telkens een tand van het ankerrad.

3.4 Regelorgaan

In een draagbaar mechanisch uurwerk vormen balans en spiraalveer het regelorgaan.
Het regelorgaan zorgt voor de nauwkeurigheid en is het hart van een mechanisch uurwerk.



Verantwoording

Geraadpleegde literatuur
-De Tijdmeester deel 1 en 2, Zadkine De Vakschool Schoonhoven
-The theory of Horology door C.A. Remondin, G. Monnier, D. Jeanneret, U. Pelarattie. ISBN 2-940025-12-6
-Horologium Oscillatorium, sive de motu pendulorum, Christiaan Huygens

Afbeeldingen
De Tijdmeester deel 1 en 2, Zadkine De Vakschool Schoonhoven, Rolex SA, Omega, The Janus Huibregt collection.

Foto's
Sander van Dam en Gertjan Westerbeke

Workshop
Met dank aan Zadkine, De Vakschool Schoonhoven, afdeling uurwerktechniek.

Bijlagen

Technische handleiding ETA 6498